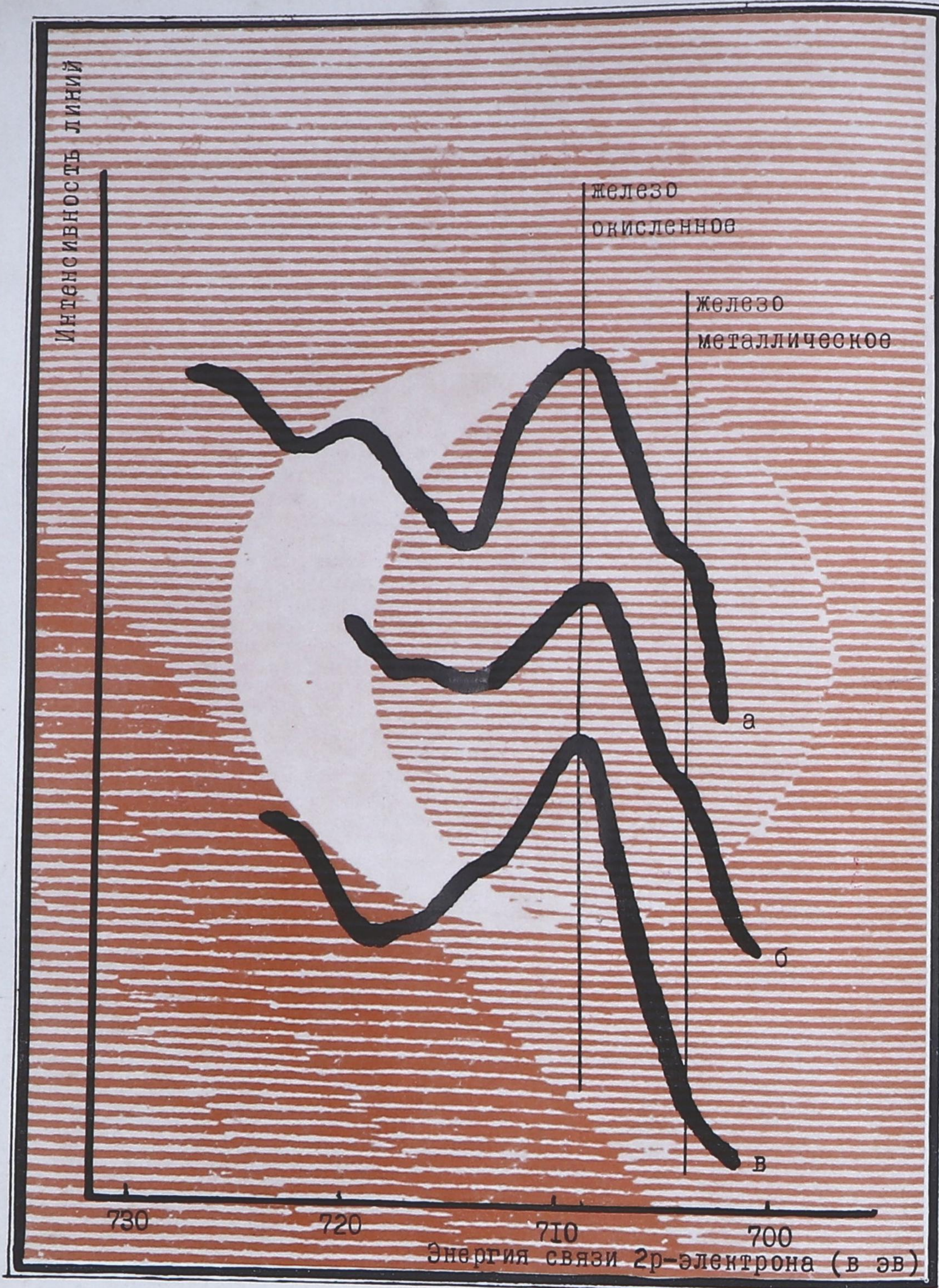


Кандидат химических наук
В. С. УРУСОВ

ЖЕЛЕЗО НА ЛУНЕ

Кое-где на Земле природа опередила человека в искусстве выплавлять железо: там, где расплавленные потоки основных и ультраосновных пород (то есть пород типа базальтов, относительно бедных кремнием, но очень богатых магнием, железом и некоторыми другими элементами основного характера), извергавшиеся из земных глубин, пересекали пласты угля, геологи обнаружили почти чистое, так называемое теллурическое (от латинского tellus — земля) железо. Как и в доменной печи, уголь тут служил восстановителем окисленного железа.

Археологи установили, что первобытный человек иногда находил чудесные металлические подарки из космоса и использовал их для изготовления своих примитивных орудий. Но эти находки, как и сегодня, были слишком редкими, и поэтому прошло очень много времени, прежде чем безвестный гений древности обратил внимание на то, что из случайно попавшего в костер куска невзрачной железной руды получился ковкий и прочный металл. Этот момент и следует считать моментом рождения земной металлургии.

ЛУННАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Когда в наши руки попало вещество с поверхности Луны, то первые же анализы показали, что поверхность сухих лунных морей (впадин) и континентов (возвышенностей и гор) состоит из пород основного типа, очень похожих на земные базальты. Того же примерно состава оказалась и лунная пыль, называемая реголитом: эта пыль покрывает плотным и довольно толстым слоем лунные моря и более тонким — континенты.

В результате прямых химических и минералогических анализов лунных базальтов и реголита было подтверждено их родство с земными базальтами, однако при этом выявились и любопытные различия. Эти различия отражают существенное несходство условий на поверхностях Земли и Луны. Ведь на Луне нет атмосферы, и поэтому поверхность естественного спутника нашей планеты непрерывно бомбардируется метеоритами и жестким космическим излучением, в том числе и так называемым солнечным ветром, представляющим собой поток протонов, ядер атомов водорода.

Одним из главных признаков такого несходства условий оказалось навязчивое присутствие во всех образцах лунных пород частичек самородного железа. Доля этих частичек была относительно невелика — не более одного, максимум нескольких процентов от всего железа, содержащегося в лунном материале и входящего в основном в состав силикатов (минералов типа оливина и пироксена), окислов (ильменита и шпинели) и сульфидов (троилита).

Но если перевести эти проценты в абсолютные цифры, то окажется, что в масштабах всей Луны масса самородного

На вклейке — *рентгеноэлектронные спектры лунного реголита (а), железного метеорита (б) и земного базальта (в).* *В спектре лунного реголита виден отчетливый пик металлического железа, в то время как в земном базальте обнаруживается только окисел.* *Это происходит потому, что железная фаза реголита необычайно устойчива к коррозии*

железа громадна и несопоставима с массой теллурического железа.

Когда этот факт был обнаружен, он сразу же, как и все неожиданное, привлек к себе особое внимание. Первый порыв тех, кто изучал доставленные на Землю образцы лунного грунта, сводился к тому, чтобы объяснить необычно большое содержание чистого железа в реголите результатом взрывов железных метеоритов, врезавшихся с чудовищной скоростью в поверхность Луны.

Однако более спокойные и более детальные исследования показали, что остатки метеоритов составляют не более 30 процентов железа, находящегося на поверхности нашего спутника. Но тогда как появились на Луне остальные 70 процентов металлического железа? Ведь тут нет залежей угля, который мог бы, как кое-где на Земле, служить восстановителем в ходе естественной доменной плавки...

Кислородное голодание — характерная черта химии Луны, селенохимии. Недостаток кислорода проявляется, например, в том, что на Луне некоторые металлы не встречаются в их высших степенях окисления. В частности, более всего интересующее нас железо, входящее в состав лунных силикатов и окислов, практически полностью находится в двухвалентном состоянии. Это и не удивительно: ведь в породах Луны активность кислорода (эта величина по существу отражает эффективную действенную концентрацию элемента, его стремление принять участие в химических реакциях) существенно ниже, чем в соответствующих породах Земли,— приблизительно в сто тысяч раз!

Так может быть, в условиях, когда практически нет сильного окислителя, не требуется и специального восстановителя? Может быть, само появление на поверхности Луны расплавленных масс базальтов в процессе вулканических извержений приводит к каким-то реакциям, высвобождающим металлическое железо из плена химических связей, возникших в более глубоких частях спутника нашей планеты?

Чтобы проверить эту гипотезу, практически одновременно и независимо друг от друга (как это часто случается, особенно когда логика исследования подсказывается самой природой), научные коллективы различных стран мира (в том числе и СССР) поставили опыты по моделированию на Земле лунного вулканического извержения. Для этого в камере, в которой поддерживался высокий вакуум (10^{-7}—10^{-9} атмосферы), расплавлялся образец земного или лунного базальта. И сразу же после появления расплава в вакуумной камере с помощью масс-спектрометра были обнаружены пары́ наиболее летучих элементов — натрия и калия, а вслед за ними и свободного железа!

В наших опытах создавались такие условия, когда пары́ могли конденсироваться на специальной подложке из кварцевого стекла. К концу опыта эта подложка покрывалась плотным темным налетом, в котором опять-таки было обнаружено металлическое железо. В исходном материале, как правило, металлического железа не было; в ходе опыта принимались все меры для того, чтобы убрать из камеры все возможные восстановители. Значит, вакуум и высокая температура сами по себе послужили восстановителями металла. Вот он, лунный вариант доменного процесса!

Эти опыты позволили понять и некоторые особенности распределения лунного металлического железа. Например, стала ясна его повсеместность и вместе с тем повышенная концентрация в лунной пыли по сравнению с кристаллическими породами (ведь лунная пыль — это и есть в значительной мере конденсат, осевший на естественную подложку — лунную поверхность), постоянная связь металла со стеклянными частицами, находящимися в реголите (также каплями конденсата).

Частичка лунного железа из пробы реголита, доставленной автоматической станцией «Луна-16». Размер шарика — около 300 микрон



Можно смело утверждать, что лунный способ восстановления металла несравненно эффективнее земного. Действительно, на Луне рудой могут служить не только окислы, но и практически любые минералы, содержащие железо, в том числе и наиболее распространенные силикаты — оливин и пироксен, которые на Земле никому и в голову не приходит использовать в качестве железных руд. Именно это и привело к тому, что по масштабам выплавки собственного металлического железа Луна оказалась далеко впереди своей хозяйки — Земли.

Но какой способ дает металл более высокого качества — земной или лунный?

УДИВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ЖЕЛЕЗА

Пожалуй, самое неожиданное свойство лунного железа мы обнаружили совершенно случайно. Все началось с того, что наша группа, руководимая академиком А. П. Виноградовым (в ее состав входили сотрудники Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского и Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова), решила изучить реголит с помощью нового метода — рентгеноэлектронной спектроскопии.

Схема опыта такова. Поток рентгеновских лучей строго определенной энергии направляется на исследуемое кристаллическое вещество и вырывает электрон, находящийся на каком-то из внутренних уровней атома. Кинетическая энергия такого «рентгеновского фотоэлектрона», насильно изгнанного из родного гнезда, измеряется в ловушке — спектрометре. Разность между этой точно измеренной энергией и энергией кванта использованного рентгеновского излучения и есть первоначальная энергия электрона в атоме.

Не правда ли, суть опыта очень проста? Но вот последующее обычно вызывает удивление: оказывается, что энергии всех электронных уровней атомов, составляющих кристалл — в том числе самых глубоких уровней, расположенных далеко от внешних валентных электронов,— зависят (хотя и не очень сильно) от состояния химической связи. Можно сказать, что любой электрон чувствует, как его товарищи в самых внешних оболочках вступают в химическое взаимодействие с электронами соседних атомов. И не только чувствует, но и с великой готовностью помогает завязавшемуся общению своими сдвигами вверх или вниз по шкале энергии.

Измерить эти так называемые химические сдвиги можно сейчас настолько точно, что по ним удается отличать друг от друга различные типы соединений, различные валентные состояния одного и того же элемента и т. д.

Чтобы дальнейшее было понятно до конца, нужно упомянуть еще об одной особенности метода рентгеноэлектронной спектроскопии: с ее помощью изучается не весь объем кристалла, а только его тончайший поверхностный слой — толщиной около 100Å. В первую минуту возникает искушение считать эту черту метода недостатком; однако именно она и обеспечивает ему огромное поле деятельности в современной науке и технике. Ведь многие конкретные задачи часто бывают связаны именно с детальным изучением свойств поверхностей кристаллов. Во всяком случае, в ходе нашего следствия, как станет ясно чуть позже, эта способность метода и сыграла решающую роль.

Итак, лунное вещество — реголит, доставленный советской автоматической станцией «Луна-16» на Землю из Моря Изобилия, помещен в спектрометр. Началось измерение энергий внутренних электронных уровней во всех основных элементах, входящих в его состав: кислороде, кремнии, алюминии, магнии, титане... Все идет хорошо, и отдельные пункты нашей анкеты заполняются спокойными ответами типа «да» — «нет», «содержится» — «не содержится», «состоит в связи» — «не состоит»...

Но вот спектр атомов железа... и прибор вдруг становится «детектором лжи», выдавая заведомо неверный ответ: рядом с пиком атомов двухвалентного железа (содержащихся в силикатах, окислах и т. д.) отчетливо виден пик металличе-

ского железа, составляющий не менее 15% по интенсивности от первого. Но ведь по всем прежним данным, многократно проверенным и подтвержденным, в этих образцах металлическое железо составляет не более 1—2% от всего содержащегося в них железа! Кроме того, хотя бы частичное окисление поверхностного слоя должно было практически полностью стереть след металлического железа на спектре. Может быть, случайная ошибка?

И вот опыт повторяется снова и снова, допрос с пристрастием продолжается, но подследственный продолжает упорно стоять на своем... Таким же упрямцем оказался и реголит из Моря Спокойствия. Подозрения в сговоре необоснованы: эти образцы были доставлены из разных лунных морей в следственные комиссии, находящиеся в разных и неблизких друг к другу странах — СССР и США.

Наконец привлекаются многочисленные свидетели по делу о лунном железе: земные, океанические базальты, отдельные минералы железа, каменные и железные метеориты, нержавеющие стали. И только в железных метеоритах и нержавеющих сталях появляется интересующий нас сигнал. Но даже в этих спектрах рядом с мощным пиком окислов сигнал о наличии атомов металлического железа выглядит довольно скромно, так как достаточно считанных секунд, чтобы свежая поверхность даже лучших «нержавеек» (к которым мы привыкли относиться с таким уважением) прореагировала с кислородом воздуха. Этот новый этап следствия убедил нас лишь в том, что прибор вполне исправен и дает разумные результаты, но само расследование еще больше зашло в тупик: ведь спектр железа в реголите, содержащем ничтожную долю металлической фазы, выглядит почти так же, как и спектры железа в кусках абсолютно чистого металла!

Так в спектральной анкете реголита появилась графа, которая заставила недавних криминалистов вновь вспомнить свои прямые обязанности исследователей: не только выявлять ускользающие научные факты, но и стремиться понять их и объяснить.

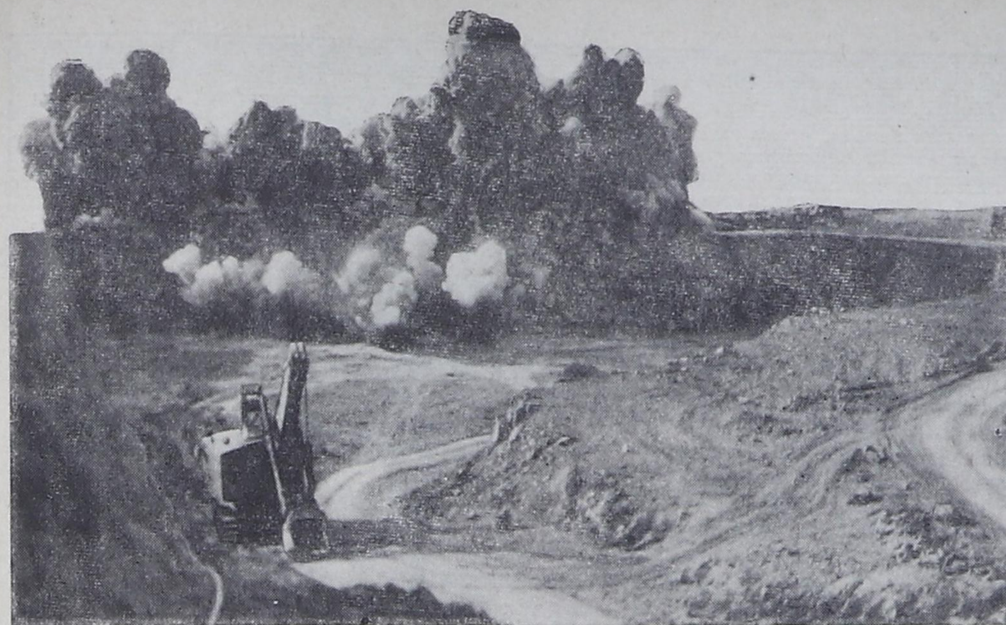
Размышления привели нас к выводу, что наблюдаемые странности лунного железа могут быть совместимы с научной логикой только при следующих двух предположениях: во-первых, что частички лунного самородного железа очень мелки, гораздо мельче частичек других минералов реголита; во-вторых, что это железо практически не окисляется кислородом земной атмосферы, с которым образцы соприкасались не менее полугода до начала наших опытов.

Первое предположение вскоре было подтверждено прямыми электронно-микроскопическими исследованиями и измерениями эффекта Мессбауэра. Оказалось, что почти половина всего металла лунных образцов представляет собой мельчайшие крупинки диаметром около 50—100 Å (и, значит, насквозь просматривается рентгеноэлектронным глазом).

Со вторым удивительным свойством лунного железа — его необычайной коррозионной устойчивостью — разобраться было гораздо труднее. Мы провели многочисленные опыты, изучая поведение разнообразных сортов железа при нагревании, испарении и распылении в высоком вакууме. Выяснилось, что подобные преобразования заметно не улучшают коррозионной устойчивости метеоритного железа, в то время как искусственное металлическое железо высокой степени чистоты (содержащее до 99,99 процентов Fe) приобретает чрезвычайную устойчивость к коррозии. Столь же стойкое (и даже более стойкое) по отношению к окислению железо образуется и при испарении в вакууме базальтов в тех модельных опытах, о которых мы уже рассказывали.

Итак, именно высокая чистота мелких частичек лунного железа и служит скорее всего основной причиной его удивительного поведения на Земле. Как не вспомнить здесь о знаменитом железном столбе близ Дели в Индии? Эта огромная колонна высотой почти в 10 метров была, по-видимому, отлита древними мастерами из очень чистого металла (содержащего до 99,7 процентов Fe) и за 3000 лет почти не пострадала от ржавчины...

Одним словом, вполне вероятно, что отныне Луна станет вдохновлять не только поэтов, но и технологов, стремящихся придать металлам устойчивость к коррозии. И будем надеяться, что это не приведет к новым недоразумениям между «физиками» и «лириками».



50 СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ВЗРЫВ НА КРАЮ ПОСЕЛКА

Рассказ об одной недавно законченной работе Фрунзенского Института физики и механики горных пород

ИНСТИТУТ ГОР

Горы — особый мир.

Ничтожное в масштабах Земли расстояние — три-четыре километра над уровнем моря — рушит привычные равнинные представления о времени, пространстве, условиях человеческого труда и быта.

Но люди идут в горы. Их ведет туда не только и не столько спортивный азарт и жажда острых ощущений — альпинистов, в конце концов, не так уж много,— но главным образом научная и хозяйственная необходимость. В Киргизии, где девять десятых территории заняты горными хребтами, эта необходимость особенно остра.

Каждая высокогорная стройка в республике — будь то плотина, канал, рудник — требует оригинальных научных и инженерных решений. Нужен скрупулезный технико-экономический расчет — строительство в горах особенно сложно и дорого. Нужна безошибочная оценка устойчивости горных склонов. Нужны многолетние точнейшие измерения ничтожных (доли микрона в год!) перемещений массивов. Нужны, наконец, особые для каждого случая методы строительства. (Наверняка второстепенный, зато весьма характерный для здешних мест штрих: нередко руководители строек и предприятий, люди по своей должности, казалось бы, не очень близкие к науке, заслуженно получают ученые степени.)

Для решения многочисленных проблем высокогорного строительства и горной